编号：164400

混合时间对燃烧稳定性影响的实验研究

王怀书，李少帅，李春炎，翁方龙，朱民

(清华大学热能工程系，热科学与动力工程教育部重点实验室，北京 100084)

摘　要：燃烧振荡是不稳定燃烧过程与燃烧室内声波耦合产生的一种现象，在燃气轮机的贫预混燃烧室中较为常见，其发生易损坏燃烧室结构及缩短运行寿命。本文通过模型燃烧室进行系列实验研究燃料与空气的混合时间对旋流预混燃烧稳定性的影响规律。实验中通过改变预混长度和空气流速来改变混合时间，通过变当量比获得燃烧振荡与稳定的范围。实验结果表明混合时间对燃烧稳定性有重要影响，仅当混合时间处于一定区间内时才有可能发生燃烧振荡，发生燃烧振荡的当量比范围也与混合时间有关。本文同时还研究了燃烧振荡频率、振幅与当量比和空气流速的关系。

关键词：混合时间；当量比；旋流预混燃烧；燃烧振荡

中图分类号：TK16　　　　　　　　**文献标识码：**A

Experimental Investigation of the Effect of Mixing Time on Combustion Stabilities

WANG Huai-Shu[1]　LI Shao-Shuai[1]　LI Chun-Yan[1]　WENG Fang-Long[1]　ZHU Min[1]

(1. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

Abstract: Combustion oscillation is a coupling phenomenon of unsteady combustion and acoustic waves in combustors, which is common in lean premixed combustors of gas turbines. The occurrence of combustion oscillation can do harm to combustor structures and shorten their operation lifetime. In this paper, the effect of fuel-air mixing time on stabilization of swirling premixed combustion was investigated through a series of experiments conducted in a model combustor. In experiments, mixing time was changed by variable premixing lengths and airflow velocities. Experiments with different equivalence ratios were conducted to obtain the ranges of combustion oscillation and stable combustion. Experimental results indicate that mixing time of fuel and air has significant effect on combustion stabilization. Combustion oscillation can only occur when mixing time is in some ranges. The range of equivalence ratio in which combustion oscillation can occur is also related to mixing time. The influence of equivalence ratio and airflow velocity on frequency and amplitude of combustion oscillation was also studied in this paper.

Key words: Mixing time; Equivalence ratio; Swirling premixed combustion; Combustion oscillation

0 引言

随着大气环境问题日益突出，各国对燃气轮机电站污染物排放的要求越来越严格。在以天然气为

收稿日期：2016-12-15

基金项目：国家自然科学基金资助项目(No. 51676110)

作者简介：王怀书(1992--)，男，硕士研究生，主要从事燃气轮机燃烧相关研究。

燃料的燃气轮机中，氮氧化物(NOx)和一氧化碳(CO)是最主要的两种污染物，其中 NOx 的排放更难控制。天然气高温燃烧时，NOx 的产生以热力型为主，由空气中的氮气(N_2)氧化生成，其在温度高于 1800 K 时变得明显并且随温度升高呈指数式上升。早前的燃气轮机通常采用扩散燃烧方式，这种燃烧方式稳定性好，但由于燃烧温度高，热力型 NOx 大量产生，无法满足当前的排放标准。为了降低燃气轮机的 NOx 排放，多种新型燃烧技术被提出，而其中被最广泛地采用的是贫预混燃烧技术。

在贫预混燃烧过程中，燃料与过量空气在预混装置内混合，再共同进入燃烧室进行燃烧。贫预混燃烧能有效降低燃烧温度，使得通过组织燃烧过程降低 NOx 成为可能，但这种燃烧方式的一个普遍问题是容易发生燃烧振荡。燃烧振荡也称“热声振荡”或“燃烧不稳定”，是由于燃烧室内放热率脉动与压力脉动及其传播、反射相互作用形成的一种周期性现象。燃烧振荡发生时，燃烧放热率及燃烧室内压力呈周期性变化，并且伴有特定频率的高强度燃烧噪声，这种放热率的变化会导致局部高温以及局部燃烧不完全，导致污染物排放增加，并且高强度的压力脉动还可能对燃烧室结构造成损坏。

在 1878 年，Rayleigh[1]首次对燃烧振荡的机理做了定性解释，称为 “瑞利准则”，被广泛地用于燃烧振荡的判断与分析。瑞利准则指出：燃烧室内同时存在放热率脉动(q')和压力脉动(p')，当燃烧区的 q'和 p'相位差小于 90° 时，不稳定燃烧释放的热量将传输给压力脉动，若这部分能量大于压力脉动在各边界处耗散的总能量，则压力脉动被持续加强直至达到平衡，引起燃烧振荡；反之，当燃烧区的 q' 和 p' 相位差大于 90° 时，则不可能发生燃烧振荡。

瑞利准则描述了燃烧振荡发生的条件，但并未给出什么情况下 p' 与 q' 的相位差会小于 90°，所以不能用于预测特定情形下是否会发生燃烧振荡。燃烧振荡的发生机理十分复杂，与流动脉动、声波传播、火焰面脉动、当量比脉动等都有关，这些因素的作用并不是单一的，而常常是共同的，并且在不同结构的燃烧室中，影响燃烧稳定性的关键因素可能并不相同，这给燃烧振荡发生与否的预测带来很大的困难。对燃烧振荡发生机理的一种基本解释是：当量比或者燃烧室内气流速度有波动时，火焰面和放热率会发生脉动，放热率的波动会导致燃烧室内压力的波动，压力波动在燃烧室内传播、反射，又会促进流速波动或当量比波动，形成正反馈，直至达到极限环振荡[2]。

Lieuwen[3]和 Auer[4]的研究均表明，燃气当量比的脉动对预混火焰动态特性有重要影响，是导致燃烧振荡的重要因素。在旋流突扩燃烧室中，气流会因为突扩面的存在而产生角涡，同时在旋流作用下会形成中心回流区，Kashan 等人[5]和 Rogers 等人[6]分别提出了湍流涡脱落也是燃烧振荡驱动因素的理论，并且被不少研究者证实。燃料与空气在燃烧前的混合过程决定了当量比的脉动，混合时间影响当量比脉动的相位，从而影响放热率脉动的相位，所以可能是决定燃烧振荡能否发生的重要因素。本文所说的混合时间指的是燃料从喷孔流动到达火焰面所需的时间。Cho 和 Lieuwen[7]的研究发现放热率脉动对速度脉动和当量比脉动的响应时间与混合时间关系密切。Lieuwen 等人[8]提出了混合时间对燃烧稳定性影响的一个简单模型，将燃烧振荡与燃烧稳定的混合时间区间定性确定了下来，具体区间数值受燃烧室结构及燃料喷口处边界条件的影响。Lee 等人[9]在研究通过二次燃料喷注对燃烧振荡进行主动控制时，发现二次燃料喷注相对于燃烧室压力脉动的时间延迟对控制效果有显著影响，并且发现时间延迟对控制效果的影响是非单调的。Richards 和 Janus[10] 以及 Steele 等人[11]分别通过实验研究了混合时间对燃烧稳定性的影响，发现混合时间处在某一区间内时燃烧不稳定，而在该区间外燃烧稳定，但他们所得到的区间范围却明显不同。已有的关于混合时间对燃烧稳定性影响的研究互相之间多有出入，尚未形成普遍适用的规律。本文将通过多组不同混合长度(L_p)、当量比(ϕ)以及空气流速(v)的实验来研究混合时间(τ)对燃烧稳定性的影响。论文第一部分将介绍实验系统与实验方法，第二部分为实验结果及分析，最后给出结论。

1 实验与测量系统

本文的实验系统如图 1 所示。实验台的主体部分是一个包含火焰观察窗的模型燃烧室，另外配有压缩空气系统、燃料气系统、冷却水循环系统、排

气系统、控制系统和数据采集系统。模型燃烧室结构如图 2 所示，燃料与空气在预混段混合后进入燃烧室进行燃烧，燃烧产物经收缩出口排出。该燃烧室的主体为双层腔体结构，两层壁面之间有循环水进行冷却，燃烧室最上游位置开有石英玻璃观察窗，用于观察火焰形状及测量放热率脉动信号。为了覆盖较大范围的混合时间，设计了两个混合长度不同的预混段(L_p = 2.5 cm 与 L_p = 10 cm)，两者除混合长度不同外其余结构完全相同，L_p = 2.5 cm 的预混装置如图 3 所示，L_p 的确定以燃料喷嘴出口为起点，以预混段出口为终点。在预混装置中，空气经过旋流叶片后与从燃料喷嘴中喷出的天然气汇合，以旋流状态进入燃烧室，轴向旋流器采用三维扭叶片，旋流数约为 0.9，喷嘴采用 5 支管×6 孔的设计，天然气顺流喷入空气流，5 支管周向均布，每支管上的喷孔由内向外逐渐变密，其目的是尽可能地使天然气在横截面上均匀分布，改善混合效果。

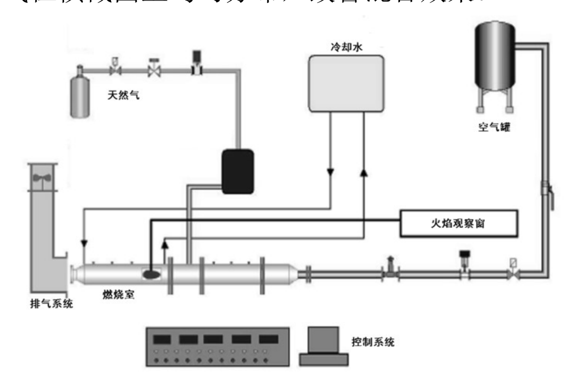


图 1 实验系统结构图

Fig. 1 Schematic of the Experimental System

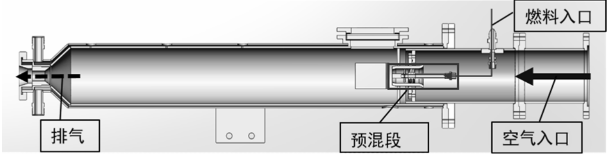


图 2 模型燃烧室结构图

Fig. 2 Schematic of the Model Combustor

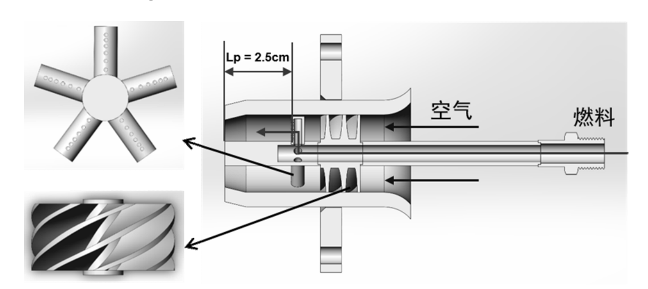


图 3 预混装置结构图

Fig. 3 Schematic of the Shorter Premixer

压力脉动信号的测量采用半无限长管法，以消除壁面腔的谐振影响，提高测量精度。由于燃烧室内温度高，无法将压力传感器直接放置在燃烧室的壁面上进行测量，因此先将压力用垂直安装在压力测点上的引压管引出，引压管外装有冷却水套，将管内温度降低到传感器工作温度范围内。引压管上端接有一个 T 型接头，动态压力传感器装在接头一端，传感器的测压头部与管内壁相切，接头的另一端连接柔性软管。放热率脉动的测量采用化学自激荧光法，由光栅光谱仪以及光电倍增管等完成。天然气燃烧时会产生多种自由基，其中 OH 基的浓度适合于表征燃烧放热率的大小，故本实验中通过测量 OH 基自激荧光(波长 309 nm)的强度信号来表征放热率脉动信号。此外，高速摄影机也被用于捕捉燃烧过程中的火焰结构变化，辅助分析燃烧振荡现象。

实验中针对两个不同混合长度的预混段，设计多组不同燃气流速(以空气平均流速表示)的实验，在每一个空气流速下，通过调节天然气流量获得不同的当量比，分别测量其压力脉动与放热率脉动，分析其燃烧稳定性。最后得到混合时间($\tau = \frac{L_p}{v}$)对燃烧稳定性的影响规律。

2 实验结果与分析

2.1 燃烧模态分析

表 1 和表 2 分别为在短预混段和长预混段上设计的实验工况，其中 f_c 指的是燃烧室内压力脉动的频率，τf_c 为一无量纲数，其能体现混合时间的影响，同时又不受特定混合时间及振荡频率的限制，有更广泛的适用性。本实验中燃烧室的压力脉动特征频率为 500 Hz 左右，故在实验设计中计算 τf_c 时均取 f_c = 500 Hz。

表 1 短预混段(L_p = 2.5 cm)实验工况表

Table 1 Cases with the Shorter Premixer (L_p = 2.5 cm)

Case	v/m/s	τf_c	ϕ

1~5	20	0.625	1.05~0.65
6~10	25	0.5	1.05~0.65
11~15	40	0.3125	1.05~0.65

表 2 长预混段(L_p = 10 cm)实验工况表

Table 2 Cases with the Longer Premixer(L_p = 10 cm)

Case	v/m/s	τf_c	ϕ
1~5	20	2.5	1.05~0.65
6~10	25	2	1.05~0.65
11~15	30	1.667	1.05~0.65
15~20	33	1.515	1.05~0.65
21~25	40	1.25	1.05~0.65
26~30	50	1	1.05~0.65
31~35	80	0.625	1.05~0.65

实验中观测到了高频振荡与稳定燃烧两类燃烧模态，二者具有明显的区别。燃烧稳定时，火焰区基本不变，火焰面有小幅的随机脉动，没有明显的燃烧噪声，p' 幅值较小，压力脉动与放热率脉动主频不同(一般情况下放热率脉动没有明显的主频)，压力脉动主频可能是高频(500 Hz 左右)或低频(100 Hz 及以下)；发生燃烧振荡时，火焰区及火焰面位置有大幅度的周期性波动，并伴有强烈的噪声，p' 幅值很大，压力脉动与放热率脉动主频相同，本实验中振荡频率在 500 Hz 左右。

以长预混段上 v = 40 m/s 时的几组工况为例，在不同的当量比下存在燃烧振荡与燃烧稳定两种工况。ϕ = 0.92 时，发生燃烧振荡。如图 4 所示，此时测量到的 p' 与 q' 信号有固定不变的相位差，总的压力脉动幅值约 6000 Pa(6%$\bar{p}$)，热与声相互耦合，发生燃烧振荡。由于压力信号测点与放热率信号测点位置不同，且动态压力传感器与光谱仪的反应时间不同，所以由图 4 无法获知某一具体位置的 p' 与 q' 之间的准确相位差。为进一步分析 p' 与 q' 的频谱特性，对测量信号进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)得到 p' 与 q' 的频域分布，分别如图 5、图 6 所示，从图中可看出 p' 与 q' 的脉动主频都是 510 Hz，说明二者实现了耦合，再次证明发生了燃烧振荡。由于 q' 的测量采用了光电转换技术和中间放大，其数值仅能代表放热率脉动的相对大小，而 p' 的测量值为动态压力传感器处的实际压力脉动值，具有实际的物理意义。由图 5 可看出，在此高频振荡中，510 Hz 的压力脉动幅值约 4500 Pa，此燃烧室内的平均压力约为 1 个大气压(101 kPa)，此时 p' 幅值达到了平均压力的 4%以上。

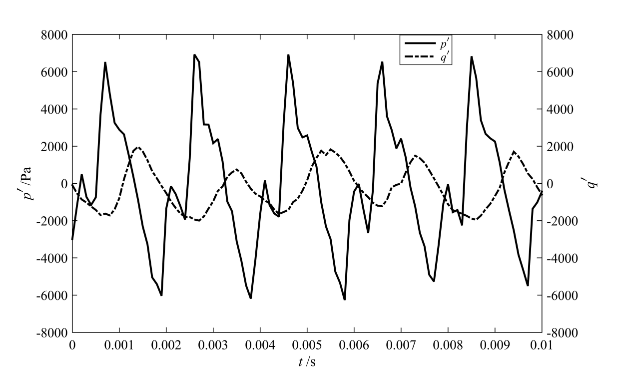


图 4 振荡工况的 p' 与 q' 相位关系

Fig. 4 p' and q' under Combustion Oscillation

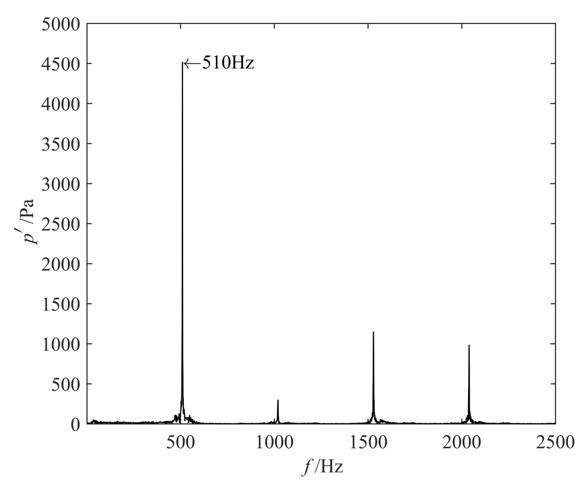


图 5 振荡工况的 p'频域分布

Fig. 5 Distribution of p' in Frequency Domain under Combustion Oscillation

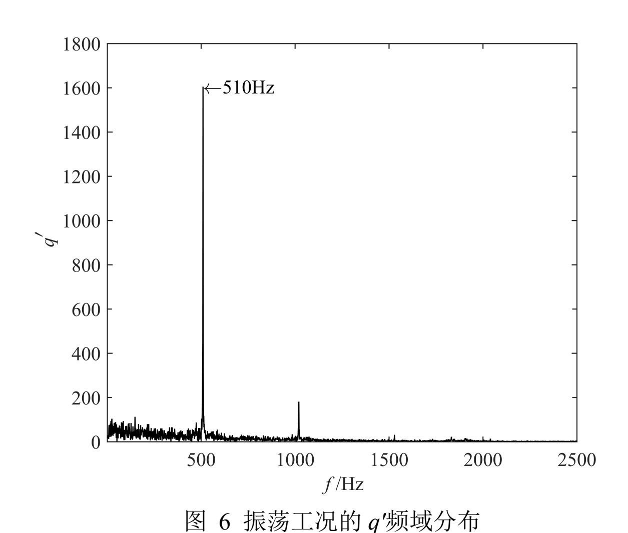


图 6 振荡工况的 q'频域分布

Fig. 6 Distribution of q' in Frequency Domain under Combustion Oscillation

高速摄影机拍摄到的高频振荡在一个周期内的火焰形状如图 7 所示，从中可以看出，发生高频燃烧振荡时，火焰形状存在轴向的大范围周期性脉动，其脉动频率与 p'、q' 相同，约 2 ms。在一个脉动周期内，火焰根部保持在预混段出口位置，但火焰形状有明显变化，对应着主火焰区的变化。周期性的压力脉动引起燃烧室内气体流速的脉动，使得火焰传播速度与气体流速之间的相对大小不断变化，导致了火焰面位置的周期性变化，火焰面位置的变化又导致放热率的脉动，放热率脉动与压力脉动相互耦合，维持振荡。

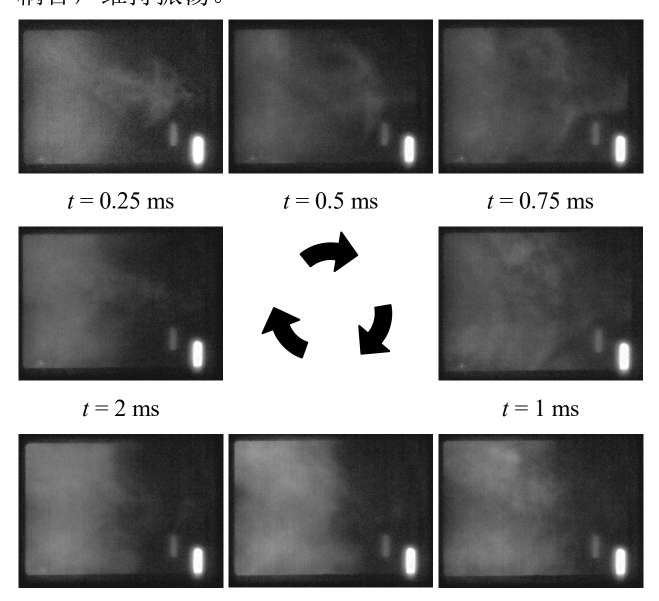


图 7 振荡工况下周期性变化的火焰

Fig. 7 Periodic Variations of Fame under Combustion Oscillation

与上述燃烧振荡状态相对，当量比减小到 0.8 以下时高频振荡消失，燃烧变得稳定，ϕ = 0.73 时的 p' 与 q' 特征如图 8 至图 10 所示。由图 8 可看出，此时 p' 与 q' 均表现出随机波动的特征，二者之间不存在确定的相位差，p' 瞬时最大值仅约 500 Pa，不足燃烧室平均压力的 1%。由 FFT 结果(见图 9、图 10)可发现，在稳定燃烧状态下，放热率脉动没有明显的主频，压力脉动在频域的分布则存在一个低频(21 Hz)峰值和一个高频(497 Hz)峰值，但对应幅值都很小，不到 100 Pa，说明此时 p' 与 q' 没有耦合，无燃烧振荡发生。由图 9 可看出，在稳定燃烧状态下，压力脉动的低频成分较多，但仍存在一个 500 Hz 附近的高频峰值，这种分布在其他稳定燃烧工况下都有出现，说明 500 Hz 是此燃烧室的一个特征频率。

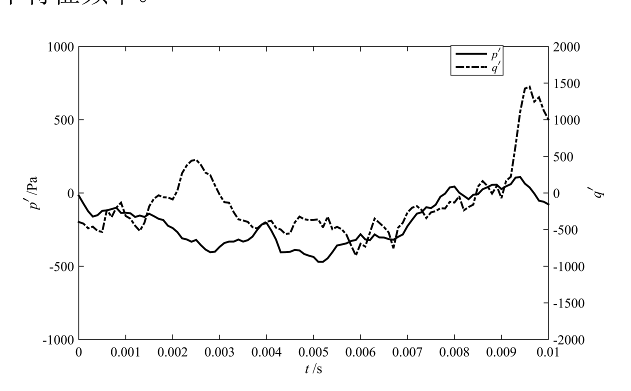


图 8 稳定工况的 p' 与 q' 相位关系

Fig. 8 p' and q' under Stable Combustion

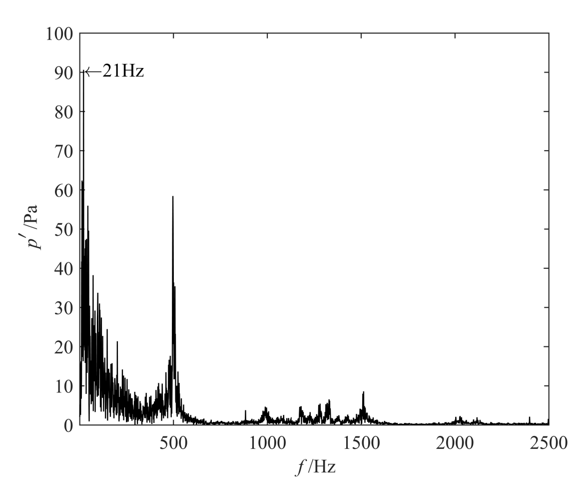


图 9 稳定工况的 p'频域分布

Fig. 9 Distribution of p' in Frequency Domain under Stable Combustion

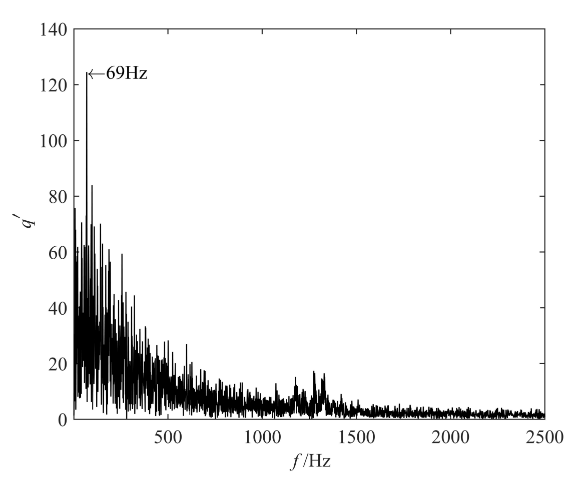


图 10 稳定工况的 q'频域分布

Fig. 10 Distribution of q' in Frequency Domain under Stable Combustion

通过高速摄影记录到稳定燃烧时一个特征周期(2 ms)内的火焰形状图像(图 11)，与高频振荡工况的图像对照，可发现此时拍摄到的火焰图像整体偏暗，这一方面是因为当量比较小时火焰温度较低，整体亮度较低，另一方面则是由于火焰形状变化不大，高速摄影机能感知的亮度变化很小。从图 11 可看出，燃烧稳定时，火焰面位置仅有小范围、非周期性的波动，火焰区基本固定。在此工况下，小幅度的压力脉动在燃烧室内传播、反射和衰减，产生一个压力脉动的初始分布，但由于 p' 与 q' 未耦合，压力脉动没有被加强，火焰形状的变化受压力脉动影响较小，呈现小幅度随机波动的特征。

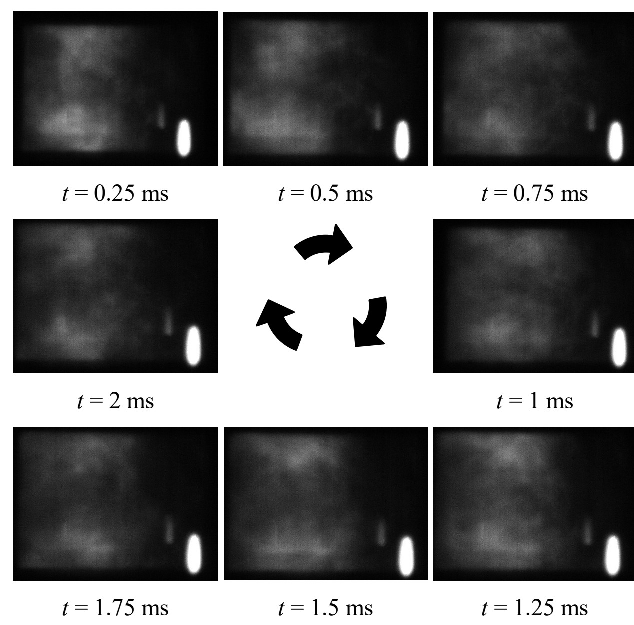


图 11 稳定工况下随机小幅变化的火焰

Fig. 11 Random Slight Variations of Flame under Stable Combustion

2.2 当量比与空气流速的影响

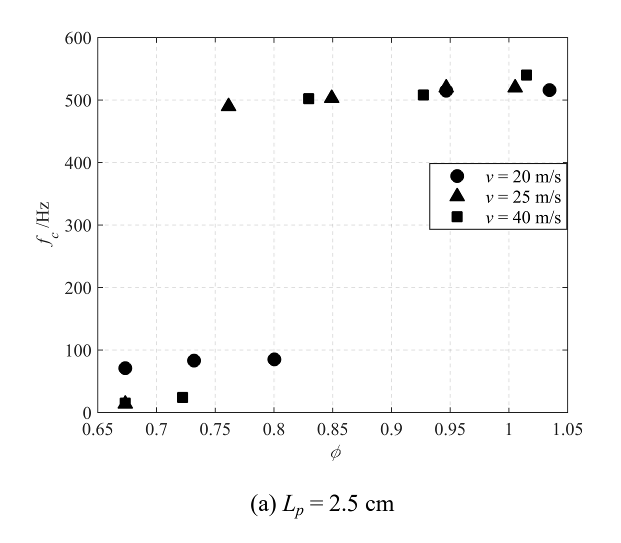
实验结果表明，当量比和空气流速都对 p' 的频率与幅值有重要影响，空气流速的影响规律在不同长度的预混段上还有所不同。结合实验现象及数据分析，取 p' 幅值大于 1000 Pa 作为燃烧振荡的判别标志，作出 p' 脉动主频与脉动幅值的分布如图 12、图 13 所示。

由图 13 可看出，燃烧振荡仅发生在当量比大于 0.8 的区域，且在不同空气流速、不同预混长度下发生燃烧振荡的当量比范围也有差异。图 13(a)表明，在短预混段(L_p = 2.5 cm)上，v = 40 m/s 与 v = 25 m/s 时无燃烧振荡发生，v = 20 m/s 时仅在 ϕ = 1.03 时有燃烧振荡发生；与此对应，在长预混段(L_p = 10 cm)上，v = 20 m/s 时无燃烧振荡发生，v = 25 m/s 时仅在 ϕ = 0.92 处发生振荡，而在 v = 40 m/s 时，在 ϕ = 0.82,0.92,0.98 处都有燃烧振荡发生。这种差异说明预混长度不同时，燃烧振荡对应的空气流速也不同，这种差异可以用混合时间来实现统一，具体将在 2.3 节讨论。

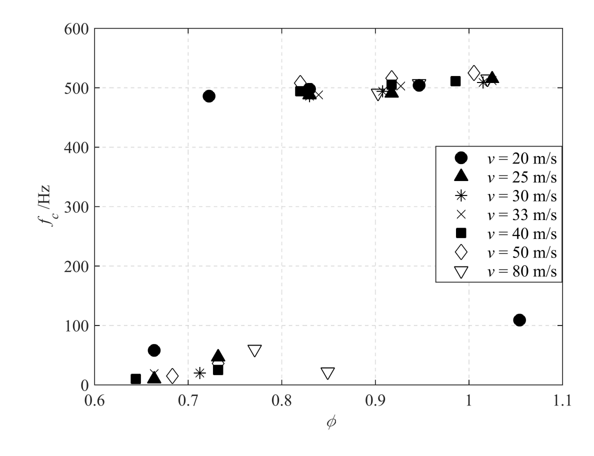
在长预混段上，除了 v = 20，25，40 m/s 的工况，还研究了其他几种空气流速下的燃烧稳定性，

如图 13(b)所示。在长预混段上，流速较低时不易发生燃烧振荡，譬如 v = 25 m/s 时，在 5 个当量比中燃烧振荡仅发生在 ϕ = 0.92 处，当流速在 30~50 m/s 之间时，燃烧振荡在当量比介于 0.82~1.03 之间时都有发生，而在 v = 80 m/s 时，燃烧振荡仅发生在当量比大于 0.9 之后。以上变化趋势表明，在同样的预混长度下，随着空气流速增加，发生燃烧振荡的当量比范围先逐渐扩大，后又有缩小的趋势，结合与短预混段的对比，说明混合时间是影响燃烧稳定性的一个重要因素。

对比图 12 和图 13 可发现，在燃烧振荡发生时，p' 的主频总在 500 Hz 附近，而在燃烧稳定时，p' 的主频可能是 500 Hz 附近的高频，也可能是 100 Hz 以下的低频，但如 2.1 节所述，即便 p' 的最大幅值出现在低频处，也仍然会在高频处出现一个脉动峰值，说明该燃烧室的特征频率在 500 Hz 左右。



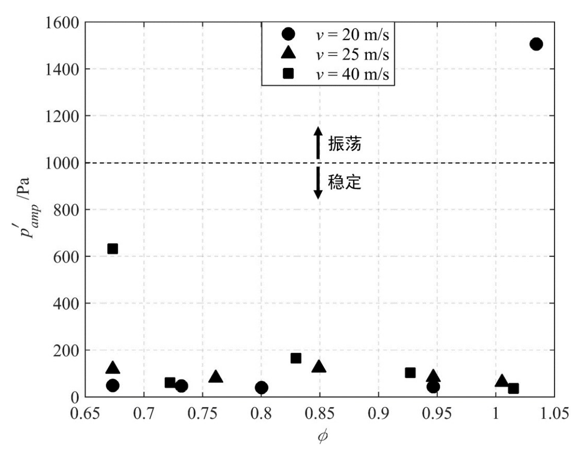
(a) L_p = 2.5 cm



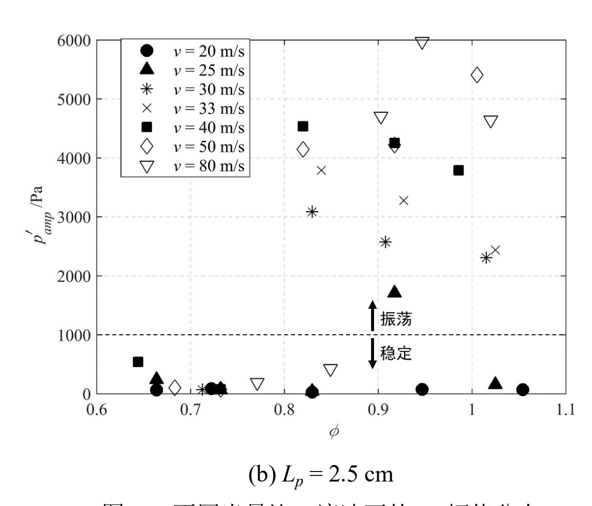
(b) L_p = 10 cm

图 12 不同当量比、流速下的 p' 主频分布

Fig. 12 Distribution of p' Frequency at Different ϕ and v



(a) L_p = 2.5 cm



(b) L_p = 2.5 cm

图 13 不同当量比、流速下的 p' 幅值分布

Fig. 13 Distribution of p' Amplitude at Different ϕ and v

在长预混段上，发生燃烧振荡的工况点较多，不同的振荡工况之间也有一些区别。图 14 和图 15 分别给出了振荡工况的 p' 主频与幅值随当量比的变化关系。由图 14 可看出，空气流速一定时，随着当量比增加，振荡频率增加；空气流速在 30~50 m/s 之间时，振荡频率随流速增加而增加，但在空气流速到达 80 m/s 前振荡频率有降低的趋势。由图 15 可看出，在不同的空气流速下，振荡幅值的极值点当量比并不一致，最大振荡幅值可能出现在当量比为 0.82、0.95 或者 1.02 处，但比较各条等流速线

上的最大值可发现，空气流速越大，其可能出现的最大振荡幅值也越大，这是因为流速大则流量大，热功率也大，所以可用于加强压力脉动的能量更多。

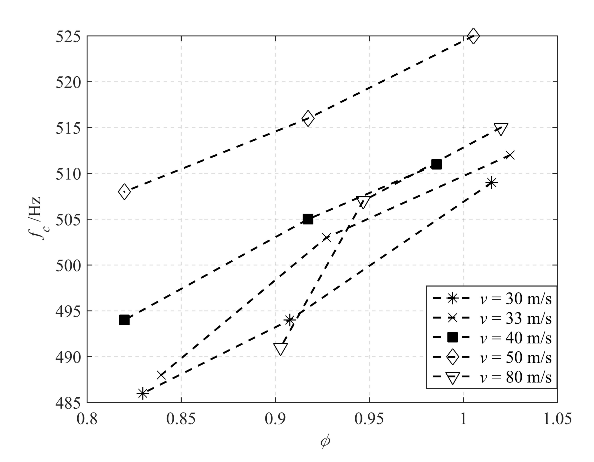


图 14 振荡工况 p'主频随当量比的变化情况

Fig. 14 Variations of p' Frequency with ϕ under Combustion Oscillation

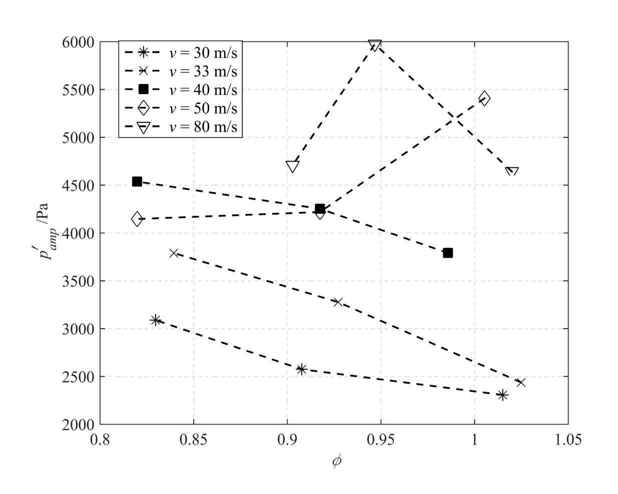


图 15 振荡工况 p'幅值随当量比的变化情况

Fig. 15 Variations of p' Amplitude with ϕ under Combustion Oscillation

2.3 混合时间的作用

多工况的对比分析表明，燃烧前的燃料-空气混合时间对燃烧稳定性有重要影响。由于空气流量远大于天然气流量，所以本文中计算混合时间时使用的流速为空气流的轴向平均速度。混合时间(τ)影响的是p' 与q' 的相位关系，若压力脉动主频(f_c)不同，则有燃烧振荡发生的混合时间也有不同，为了扩展适用性，可采用 τf_c这一无量纲数来表示混合时间对燃烧稳定性的影响。如前所述，本燃烧室的特征频率为 500 Hz 左右的高频，所以计算f_c时均取 p' 的高频峰值频率。以无量纲数 τf_c及当量比 ϕ表示的燃烧稳定性分布如图 16。

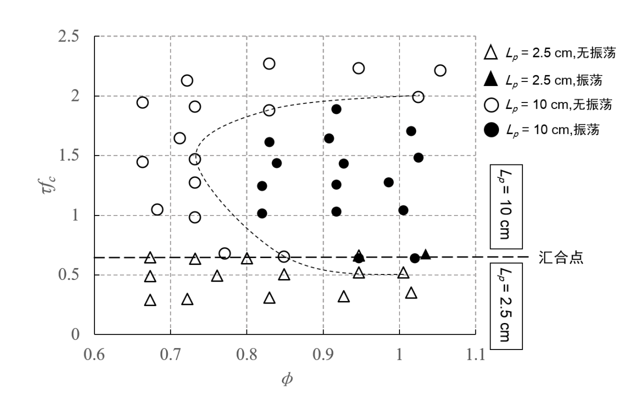


图 16 以 τf_c 及 ϕ为变量的燃烧稳定性分布

Fig. 16 Combustion Stabilization Distribution with τf_c and ϕ

由图 16 可看出，无论在长预混段还是短预混段上，燃烧振荡都只发生在 ϕ> 0.8 的区域，在 $\tau f_c\approx$ 0.6 处两种预混长度对应的燃烧稳定性具有良好的一致性，发生燃烧振荡的当量比范围相对于 τf_c> 0.6 的情形有缩小的趋势，这说明混合时间是比流速和混合长度更为根本的影响因素。从整体来看，燃烧振荡仅发生在$0.5 < \tau f_c < 2$的区间内，且越靠近边界，则发生燃烧振荡的当量比范围越小，越不容易发生燃烧振荡。

图 17 为以 p' 幅值为纵坐标，以 τf_c 为横坐标表示的燃烧稳定性分布图。图中的圆圈表示实验工况点，以 1000 Pa 为界，很容易看出能发生燃烧振荡的 τf_c 区间为(0.5,2)，并且 τf_c 越小，可能出现的振荡幅值越大,因为此时流量更大，热功率也更大。

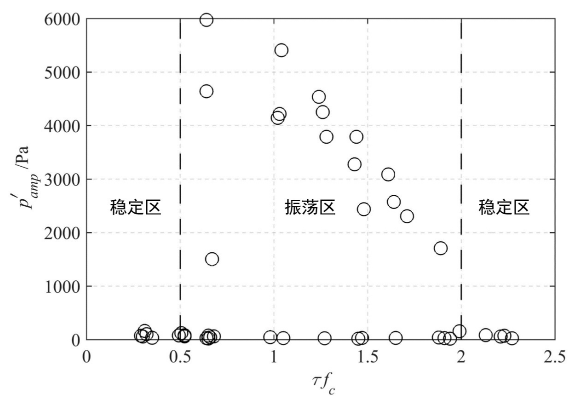


图 17 燃烧稳定与燃烧振荡的区间分布

Fig. 17 Ranges of Stable Combustion and Combustion Oscillation

实验中发现能发生燃烧振荡的 τf_c 区间为(0.5, 2)，在此区间外燃烧能保持稳定，但由于实验条件限制，能进行的实验工况有限，故而无法确定下一个振荡区间的位置。由于混合时间影响的是放热率的相位，而燃烧振荡是否发生取决于 p' 与 q' 之间的相位差，因为 f_c 反映的是 p'的周期，所以发生燃烧振荡的 τf_c 区间也应该是周期性地出现的，并且如果假设($\tau+\tau_0$)就是 q'的相位的话(注：τ_0 为化学反应时间)，理论上其周期应该是 1，这与实验结果不符。实验结果反映出的燃烧振荡单区间长度约 1.5，已经超出了理论上的区间重复周期，这一方面是受到简化处理的影响，另一方面则是由于燃烧振荡发生机理的复杂性。首先，在时间延迟模型中，放热率脉动对压力脉动的响应时间延迟包括压力脉动向上游传输到燃料喷口的时间、压力脉动引起燃料喷口处当量比脉动所需的响应时间、喷口处当量比脉动传输到火焰面所需的对流混合时间以及化学反应时间，此处仅考虑了混合时间一项，对其他类的时间延迟可能的变化无法考虑；其次，混合时间的真实意义是燃料从喷口到达火焰面所需的时间，本实验中做了两点简化：一是用空气流的平均轴向流速来近似燃料流速，二是由于火焰面距离预混段出口的位置处于不断变化中，不便数据处理，所以预混距离被简化为从燃料喷口到预混段出口的距离，忽略了从预混段出口到火焰面这一段距离，对混合时间计算的精确度有影响；最后，时间延迟模型的建立基于的是压力脉动对当量比脉动的影响，进而影响放热率脉动，引起燃烧振荡，而在实际的燃烧过程中，燃烧振荡的发生机理十分复杂，目前尚不十分清楚，所以在实验中观测到的燃烧振荡可能是这一机理与其他机理共同作用的结果，比如涡脱落影响涡内燃烧，从而激发燃烧振荡的机理等。

尽管实验所得的燃烧振荡区间与简化的时间延迟模型的预测有所偏离，但实验结果也反映出了混合时间对燃烧稳定性的重要影响，燃烧振荡只在一定的混合时间范围内发生，这说明通过改变燃烧室结构设计来减少或避免燃烧振荡是可能的。另一方面，实验结果与理论预测的不同也反映出当前对燃烧振荡发生机理的研究仍不成熟，还需学界同仁的共同努力。

3 结论

本文通过改变预混长度、空气流速以及当量比，对混合时间与旋流预混燃烧稳定性的关系进行了实验研究，得到以下结论：

(1)混合时间对燃烧振荡发生与否有重要影响，仅当混合时间处于一定范围内时，燃烧振荡才可能发生，并且越靠近区间边界，发生燃烧振荡的当量比范围越小；

(2)燃烧振荡发生时，相同流速下，振荡主频随当量比增大而提高，这是因为随着当量比增加，燃烧温度提高，声速增大；

(3)若能发生燃烧振荡，空气流速越大，则整体热功率越大，变当量比时可能出现的最大振荡幅值越大；

(4)本燃烧室中燃烧振荡仅发生在 $\phi > 0.8$ 的情况下，低当量比时由脉动燃烧传递给压力脉动的能量低于从边界耗散的能量，无法激发燃烧振荡。

参考文献

[1] Rayleigh J W S. The explanation of certain acoustical phenomena[J]. Nature, 1878, 18(455): 319-321.

[2] Lieuwen T C, Yang V. Combustion instabilities in gas turbine engines(operational experience, fundamental mechanisms and modeling)[M]. Progress in astronautics and aeronautics, 2005.

[3] Lieuwen T, Neumeier Y, Zinn B T. The role of unmixedness and chemical kinetics in driving combustion instabilities in lean premixed combustors[J]. Combustion Science and Technology, 1998, 135(1-6): 193-211.

[4] Auer M P, Hirsch C, Sattelmayer T. Influence of the interaction of equivalence ratio and mass flow fluctuations on flame dynamics[C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2005: 249-257.

[5] Kaskan W E, Noreen A E. High-frequency oscillations of a flame held by a bluff body[J]. ASME Transactions, 1955, 77(6): 855-891.

[6] Rogers D E. A mechanism for high-frequency oscillation

in ramjet combustors and afterburners[J]. Journal of Jet Propulsion, 1956, 26(6): 456-462.

[7] Cho J H, Lieuwen T C. Modeling the response of premixed flames to mixture ratio perturbations[C]//ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2003: 67-76.

[8] Lieuwen T, Torres H, Johnson C, et al. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors[C]//ASME 1999 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1999: V002T02A001-V002T02A001.

[9] Lee J G, Kim K, Santavicca D A. Effect of injection location on the effectiveness of an active control system using secondary fuel injection[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 739-746.

[10] Richards G A, Janus M C. Characterization of oscillations during premix gas turbine combustion[C]//ASME 1997 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1997: V002T06A033-V002T06A033.

[11] Steele R C, Cowell L H, Cannon S M, et al. Passive control of combustion instability in lean premixed combustors[C]//ASME 1999 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 1999: V002T02A004-V002T02A004.